

**Svatopluk KOŘALKA<sup>1</sup>, Michal PITRÁK<sup>2</sup>**

**VLNOVÁ AKUSTICKÁ KAROTÁŽ**

**FULL WAVE ACOUSTIC LOG**

**Abstrakt**

Naše společnost zakoupila v červenci 2008 karotážní akustickou sondu s registrací úplného vlnového obrazu. Systém vyrábí Advanced Logic Technology (ALT) Company – Redange (Luxembourg). Povrchová registrační jednotka Matrix je kompatibilní s karotážními sondami vyráběnými Mount Sopris USA a ALT Luxembourg. Software (WellCad) umožňuje výpočet geomechanických vlastností hornin. Zdrojová data jsou z karotážních měření (vlnová akustická karotáž, kavernometri, hustotní karotáž). V příspěvku jsou první měření vlnové akustické karotáže v různých typech hornin.

**Abstract**

In the middle of the last year (July 2008), well logging acoustic probe FWS50 with registration of full wave image was acquired by our company. This system is product of Advanced Logic Technology (ALT) Company – Redange (Luxembourg). The surface registration unit named „Matrix“ is compatible with well logging probes produced by Mount Sopris USA and ALT Luxembourg companies. The software (programme WellCad) enables calculation of geomechanical properties of rocks. Source data are acquired by means of well logging measurements (full wave acoustic log, calliper log density log). The first results of well logging measurements with probe FWS50 in the different types of rocks are demonstrated in following paper.

**Úvod**

V polovině roku 2008 naše firma zakoupila karotážní akustickou sondu s registrací úplného vlnového obrazu všech přijímačů typu FWS50 od firmy Advanced Logic Technology (ALT), která sídlí v obci Redange v Luxembourg. Tato firma je úzce provázána s americkou firmou Mount Sopris a karotážní sondy a povrchové jednotky jsou vzájemně kompatibilní. Akustická vlnová sonda FWS50 pracuje s povrchovou univerzální jednotkou Matrix, která zpracovává digitální měření ze všech vyráběných sond firmou ALT a komunikuje i s dalšími staršími analogovými impulsními systémy od jiných výrobců (GOI, MLS – USA, ELGI – Maďarsko a RG – Anglie). Měřicí systém Matrix umožňuje přímou registraci vybraných parametrů u jednotlivých typů sond a u akustické karotáže zápis celého vlnového obrazu všech třech přijímačů do výkonného notebooku. Měřicí jednotka Matrix byla zabudována do karotážní aparatury GOI

---

<sup>1</sup> RNDr. Svatopluk Kořalka, AQUATEST a.s., Geologická 4, Praha 5, [koralka@aquatest.cz](mailto:koralka@aquatest.cz)

<sup>2</sup> RNDr. Michal Pitrák, Ph.D., AQUATEST a.s., Geologická 4, Praha 5, [pittrak@aquatest.cz](mailto:pittrak@aquatest.cz)

s hydraulickým vrátkem s cca 1600 m čtyřžilového kabelu namontované v dodávkovém automobilu IVECO DAILY (obr. 1-3).

### **Základní parametry sondy FWS50 a měřicí jednotky Matrix**

- ❑ průměr sondy 50 mm bez centrátorů, délka 2.6 m, max.teplota 70°C, max.tlak 200 bar, tj. max. hloubkový dosah cca 2000 m, pracující na jednožilovém nebo 4-žilovém kabelu, možnost režimu vlnové akustické karotáže a cementlogu CBL,
- ❑ máme k dispozici centrátory od průměru vrtů 76 mm do cca 250 mm
- ❑ jeden keramický piezoelektrický vysílač pracující s frekvencí 20 kHz, tři přijímače v geometrii – vysílač 0.6 m první přijímač 0.2 m druhý přijímač 0.2 m třetí přijímač, min.vzorkovací frekvence 2.0  $\mu$ sec,
- ❑ povrchová jednotka Matrix včetně měřícího software je napájena síťovým napětím 220V, vstup: 4 žíly kabelu, startovací impulsy od fotostartéru (min. krok měření 2 cm), výstup USB rozhraním do notebooku,
- ❑ přímo registrované parametry sondou FWS50:
  - úplné vlnové obrazy všech třech přijímačů
  - časy prvního nasazení na všech třech přijímačích
  - zpomalení 1 (delta T1) mezi prvním a druhým přijímačem (základna 0.2 m)
  - zpomalení 2 (delta T2) mezi druhým a třetím přijímačem
  - v režimu cementlogu CBL amplituda a čas prvního nasazení na prvním přijímači



**Obr. 1** Aparatura IVECO DAILY



**Obr. 2** Sonda vlnové akustické karotáže FWS50



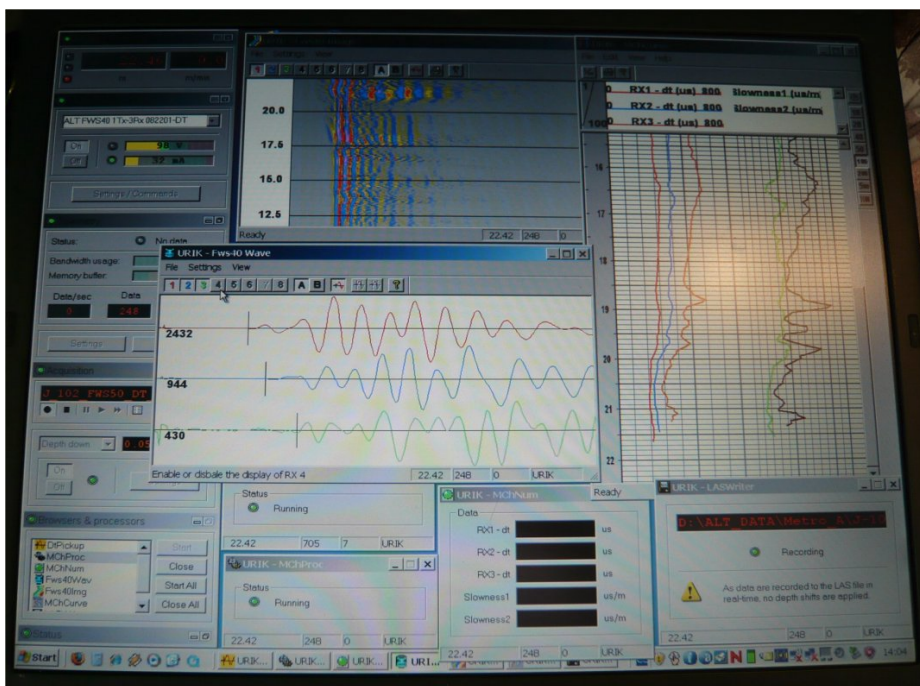
**Obr. 3** Povrchová jednotka Matrix

### **Zpracovatelský software WellCad**

Univerzální software WellCad je tvořen modulově a zpracovává karotážní měření prováděná různými karotážními sondami (např. hustotní měření, neutronová měření, vlnovou akustickou karotáž, akustický a optický televizor, cementlog, inklinometrii, profilometrii a další). Umožňuje mj. provést litologickou a stratigrafickou interpretaci, tvorbu crossplotů. Komunikace s jinými zpracovatelskými systémy je umožněna vstupem a výstupem karotážních dat v univerzálním formátu LAS, který je respektován rovněž námi používaným software pro zpracování karotážních dat GDSsoftware (verze 4 nebo 5) RNDr. Jiřího Křesťana CSc.

Verze, kterou vlastníme, vedle obecných interpretačních postupů, umožňuje zpracování vlnových akustických měření a cementlogu. Z registrovaných úplných vlnových obrazů vlnové akustické karotáže lze stanovit tyto parametry (obr. 4):

- ❑ znovu určit časy prvních nasazení u všech přijímačů (jsou již jednou registrovány při vlastním měření softwarem Matrix), kdy lze vybrat optimální podmínky pro odečet těchto časů,
- ❑ metodou podobnosti (Semblance) analyzovat úplný vlnový obraz všech třech přijímačů, vydělit jednotlivé typy vln a stanovit rychlosti (zpomalení) podélných a příčných vln příp. dalších vln,
- ❑ geomechanické vlastnosti hornin (Poissonovo číslo, modul pružnosti ve smyku, Youngův modul pružnosti, modul objemové pružnosti a modul stlačitelnosti), kde vedle naměřených hodnot rychlosti podélných a příčných vln vstupuje do výpočtu ještě objemová hustota. Hlavní předností vlnové akustické karotáže je, že umožňuje přímý výpočet rychlosti podélných a příčných vln a Poissonova čísla na rozdíl od klasické akustické karotáže, která měří rychlost pouze podélných vln a hodnotu Poissonova čísla je nutno odhadnout podle druhu horniny pomocí empirických regresních závislostí,
- ❑ v režimu cementlogu lze z vlnových obrazů znova stanovit čas prvního nasazení a jeho amplitudu a vybrat pro zpracování optimální pozici a šíři měřicího intervalu, ze kterého je amplituda prvního nasazení odečítána.



**Obr. 4** Obrazovka metody vlnové akustické karotáže

## Vztahy pro výpočet geomechanických vlastností hornin užívaných systémem WellCad

Pro výpočet jednotlivých geomechanických parametrů z měření vlnové akustické karotáže používá systém programů WellCad tyto vztahy:

Poissonovo číslo n:

$$n = \frac{0.5(dts/dtc)^2 - 1}{(dts/dtc)^2 - 1}$$

, kde     dts.....zpomalení příčných vln (μsec/m)  
              dtc.....zpomalení podélných vln (μsec/m)  
              n.....Poissonovo číslo

Modul pružnosti ve smyku G (MPa E-9):

$$G = \frac{DENA}{dts^2}$$

, kde     G.....modul pružnosti ve smyku (MPa)  
              DENA....objemová hmotnost (Bulk Density) (gccm)  
              dts.....zpomalení příčné vlny (μsec/m)

Youngův modul pružnosti ED (MPa E-9):

$$ED = 2 * G * (1 + n)$$

, kde     ED..... Youngův modul pružnosti (MPa)  
              G..... modul pružnosti ve smyku (MPa)  
              n..... Poissonovo číslo

Modul objemové pružnosti P (MPa E-9):

$$P = DENA * \left( \frac{1}{dts^2} - \frac{4}{3dts^2} \right)$$

, kde     DENA....objemová hmotnost (Bulk Density) (gccm)

dts.....zpomalení příčných vln (μsec/m)  
 dtc.....zpomalení podélných vln (μsec/m)  
 n.....Poissonovo číslo

Modul stlačitelnosti S (MPa E-9):

$$S = \frac{1}{P}$$

, kde P.....modul objemové pružnosti P (MPa).

### **Příklady měření s vlnovou akustickou karotáží (sonda FWS50 – ALT)**

Provozně byla sonda používána cca od srpna 2008. Vykázala velmi dobrou provozní spolehlivost. Během cca 7 měsíců bylo změřeno cca 100 vrtů za různých provozních podmínek bez jakékoliv závady. Vlnovou akustickou karotáž jsme využívali převážně na úkolech, kde bylo třeba ověřit tektonickou porušenost horninového masivu, puklinové kolektory a stanovit geomechanické vlastnosti hornin ( inženýrsko – geologický průzkum pro dopravní stavby –zejména pro tunely a metro). Vlnová akustická karotáž našla uplatnění i při karotáži hydrogeologických pozorovacích vrtů jak při hydrogeologickém průzkumu a při likvidaci starých ekologických zátěží. V silně porušených prostředích, kde útlum signálu klasické akustické karotáže již neumožňoval spolehlivou registraci příchodu akustického signálu k přijímači, vlnová akustická karotáž poskytla spolehlivé výsledky.

Následuje několik příkladů měření v různých horninových prostředích. Je vždy uveden výsledek měření vlnové akustické karotáže a souborné výsledky ostatních karotážních metod:

*Ukázka č.1* (prachovité břidlice Barrandienu – šárecké souvrství) Praha-Veleslavín (prodloužení trasy A pražského metra) – obr. 5-6

- ☐ jedná se o ordovické prachovité břidlice místy písčité, středně tektonicky porušené,
- ☐ podle geologického popisu pevnostní zatřídění R5,
- ☐ vrt o hloubce 37.5 m průchodný do 36.5 m, vrtný průměr wire-line N (76 mm),
- ☐ ustálená hladina vody: 5.7 m, interval měření: 10.5 – 35.5 m
- ☐ dobré podmínky pro měření vlnové akustické karotáže, kvalita registrovaných vlnových obrazů byla velmi dobrá a bylo možno jednoznačně zpracování a výpočet všech parametrů

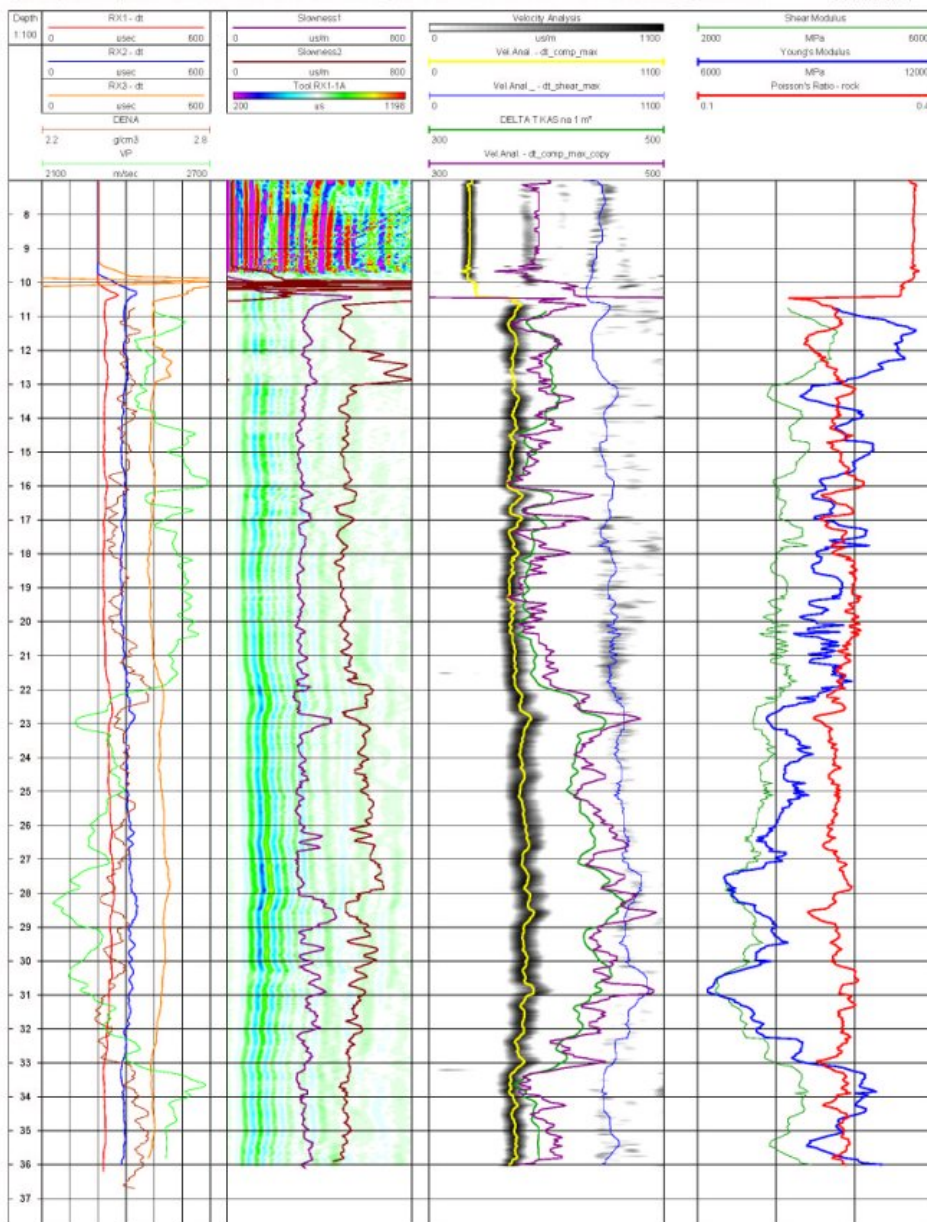
V posledním sloupci na obr. 5 jsou některé vypočtené geomechanické parametry (Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo), v předposledním sloupci je srovnání rychlosti podélných vln z měření vlnové akustické karotáže a klasické maďarské akustické karotáže sondou KAS-2-43 (ELGI – Maďarsko). Záměrně je na obrázku



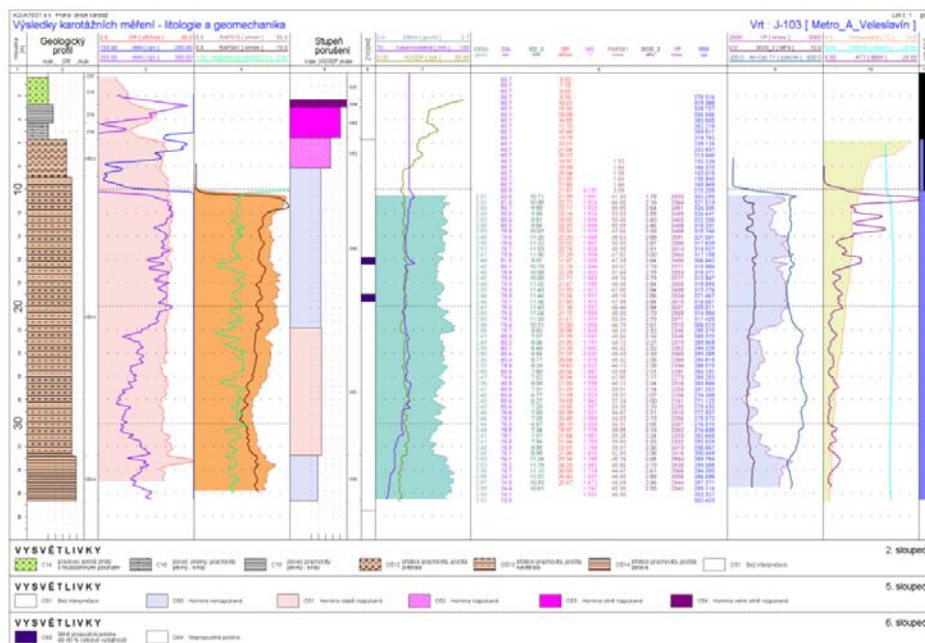
ponechán přechod do pažnice v hloubce cca 10 m. Na následujícím obrázku jsou prezentovány výsledky dalších metod na stejném vrtu.

Výsledky akustických karot, měření sondou ALT FWS50 s registrací vlnového obrazu ve vrtu J-103 Metro\_A\_Veoslavín

Příloha č. 47



**Obr. 5** Vlnová akustická karotáž ve vrtu pro Metro-Veoslavín



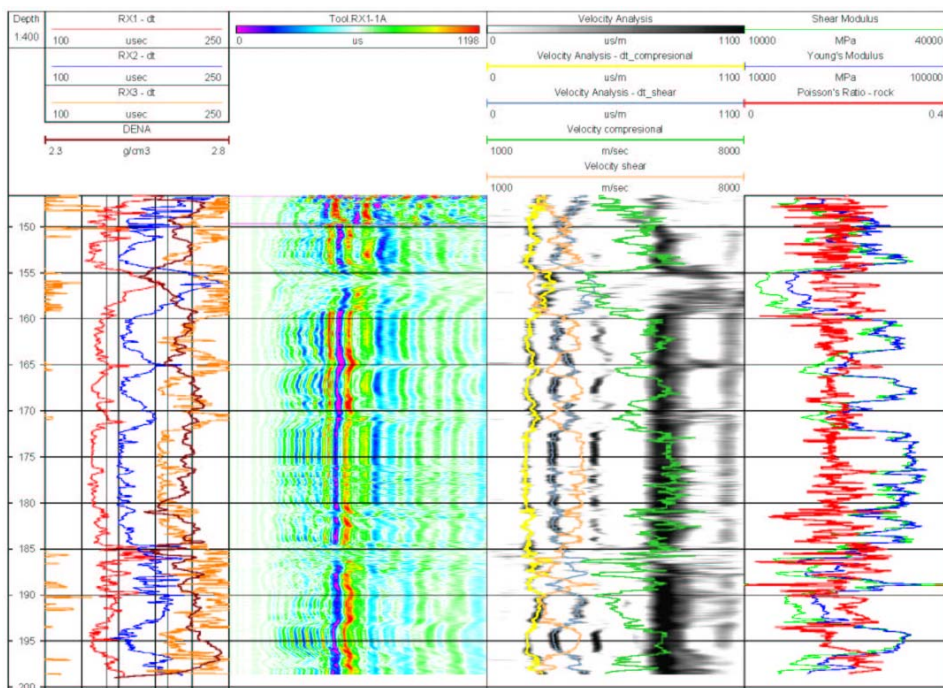
**Obr. 6** Výsledky ostatních karotážních metod ve vrtu pro Metro – Veleslavin

Na obou příkladech je jednoznačně detekována geomechanicky oslabená partie v úseku cca 22.0 – 33.0 m.

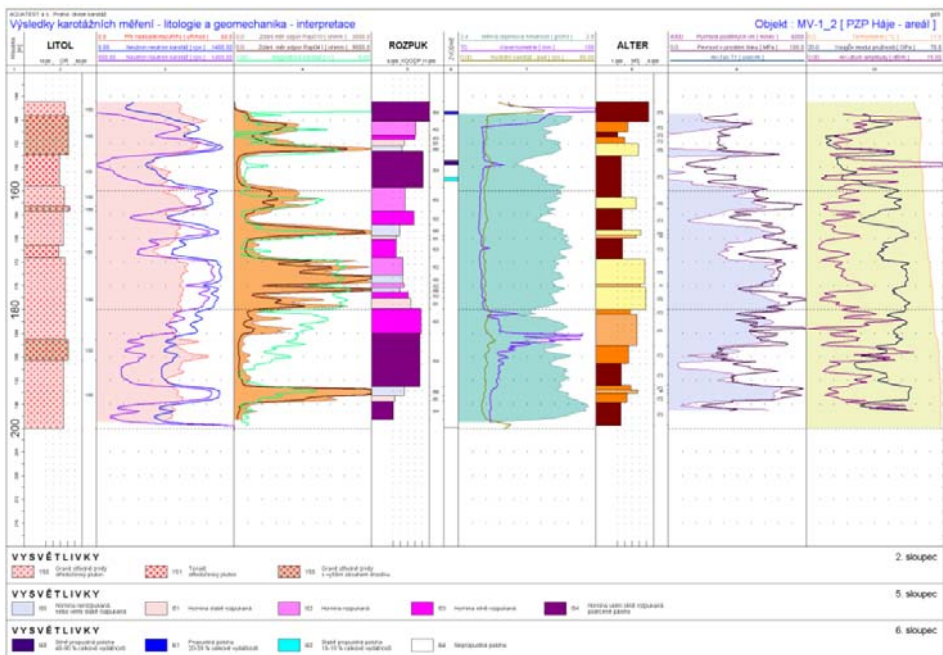
**Ukázka č.2** (granity a tonality středočeského plutonu) - Háje (Milín) – monitorovací hydrogeologický vrt – obr. 7-

- ☐ jedná se o granity a tonality silně rozpukané s pevnostním zatříděním R1 až R2,
- ☐ vrt o hloubce 200.6 m průchodný do 200.6 m, vrtný průměr wire-line N (76 mm), pažnice Fe do hl. 148.5 m
- ☐ ustálená hladina vody: 13.9 m, interval měření: 148.5 – 199.0 m
- ☐ vzhledem k silnému tektonickému rozpukání hornin byly zhoršené podmínky pro měření akustické karotáže (přeskoky fází, zeslabený signál zejména u třetího nejvzdálenějšího přijímače),
- ☐ přes nepříznivé podmínky měření umožnil systém WellCad jednoznačné zpracování a výpočet rychlosti podélné a příčné vlny a geomechanických vlastností hornin.





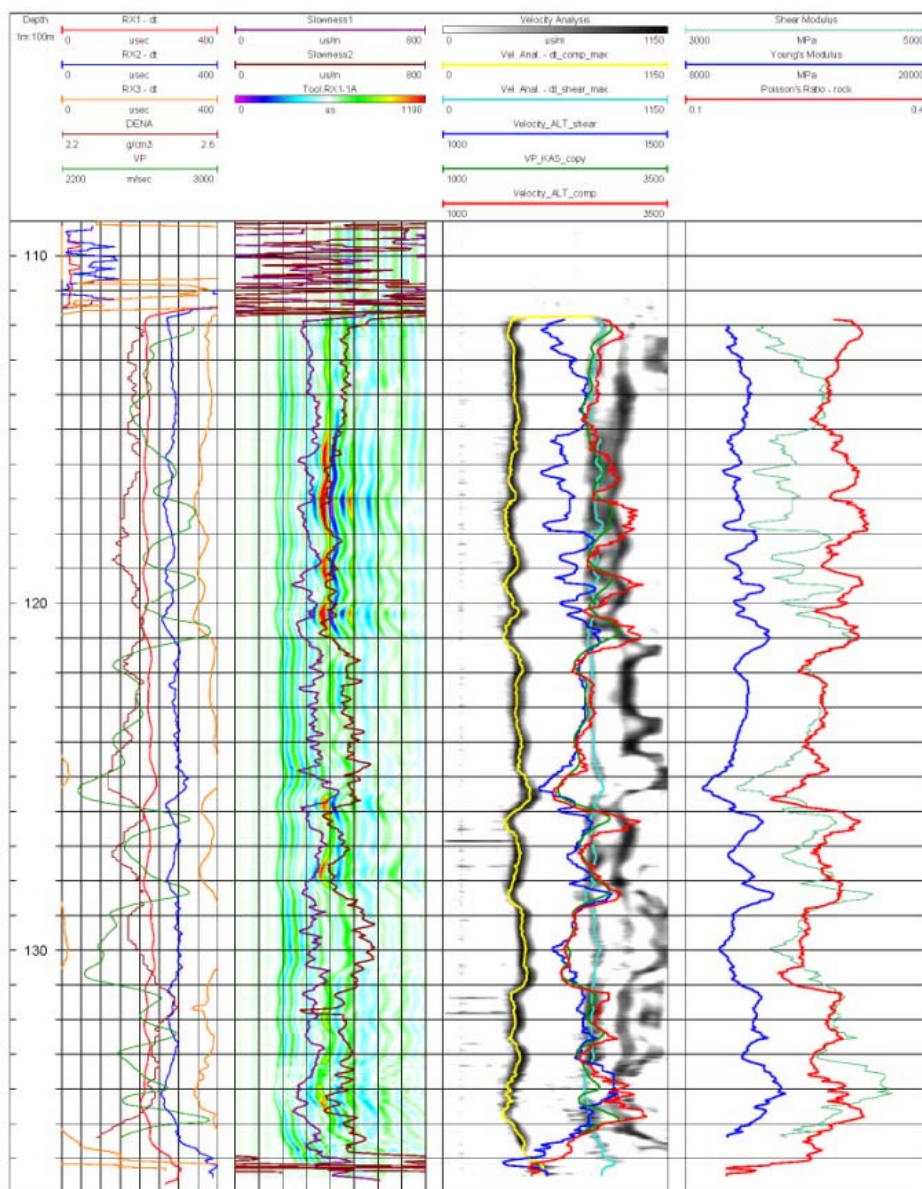
Obr. 7 Výsledky vlnové akustické karotáže ve vrtu Háje



Obr. 8 Výsledky ostatních karotážních metod ve vrtu Háje

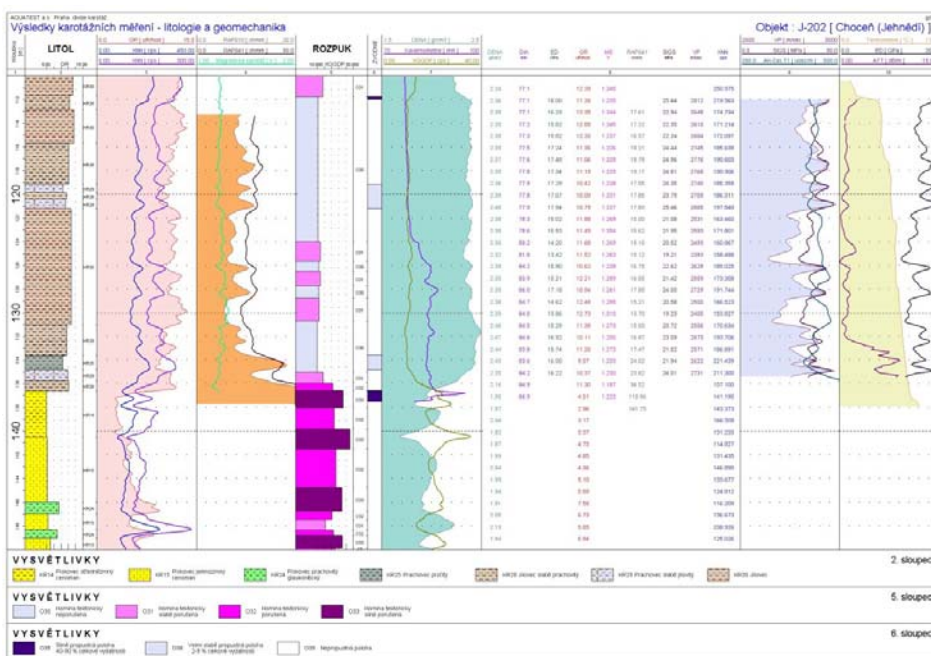
V relativně silně rozpukaném prostředí vlnová karotáž vydělila poruchová pásma v souladu s výsledky ostatních karotážních metod (elektrokarotáž, hustota, neutronová pórovitost) – dominantní porušené pásmo je v hloubce 155.0 – 159.0 m.

*Ukázka č.3 (turonské prachovce místy jílovité – česká křída) v oblasti Brandýsa nad Orlicí – inženýrsko-geologický vrt při průzkumu pro železniční tunel – obr. 9-10*



**Obr. 9** Výsledky vlnové akustické karotáže ve vrtu Chocen

- ❑ jedná se o tuřonské prachovce místy jílovité až jílovce s pevnostním zařazením R3 až R4,
- ❑ vrt o hloubce 154.0m průchodný do 137.0 m, vrtný průměr wire-line N (76 mm), pažnice Fe do hl. 10.4 m
- ❑ ustálená hladina vody: 111.8 m, interval měření: 109.0 – 137.0 m
- ❑ horniny ve vrtu byly do hloubky 137 m málo tektonicky porušené (v silně porušené části vrtu došlo v hl. 137 m k zavalení vrtu), dobré podmínky pro měření akustické karotáže (bez přeskoků fází) a kvalita registrovaných vlnových obrazů byla velmi dobrá,
- ❑ systém WellCad umožnil jednoznačné zpracování a výpočet rychlosti podélné a příčné vlny a geomechanických vlastností hornin.



**Obr. 10** Výsledky ostatních karotážních metod ve vrtu Choceň

Horniny v měřeném úseku jsou geomechanicky stabilní. Opět se prokázala dobrá shoda mezi vlnovou a klasickou akustickou karotáží. Zjištěné geomechanické moduly a Poissonovo číslo odpovídá zařazení zastižených hornin.

## Závěr

Prezentované příklady měření dokladují, že metoda vlnové akustické karotáže poskytuje dobré výsledky v různých horninových prostředích. Je třeba ještě ověřit její použitelnost v nekompaktních horninách s geomechanicky horšími parametry (např. terciér). Metoda umožňuje rozčlenit zastižené horniny do geomechanicky homogenních celků, zejména jednoznačně ohraničí tektonicky porušené nestabilní horniny. Detekce všech úplných vlnových obrazů umožňuje vedle rychlosti podélných vln, stanovit i rychlost příčné vlny a tím i přímé zjištění Poissonova čísla. Je schopna kvantitativně

ocenit jednotlivé geomechanické moduly měřeného horninového prostředí. Zejména pro inženýrsko-geologické účely poskytuje souvislou informaci o geomechanice hornin v celém profilu vrt na rozdíl od bodových nereprezentativních laboratorních vzorků hornin.

Lze konstatovat, že je plně zvládnuta metodika měření a základního vyhodnocení vlnových obrazů. V současné době pokračuje studium interpretačních postupů, protože každé prostředí vyžaduje nastavení interpretačních podmínek podle rychlostí vln, jejich útlumu a případných přeskoků fází, interpretace probíhá interaktivně a geofyzik musí zadat optimální podmínky pro používaný software.

### **Literatura**

- [1] KOŘALKA, S. Zavedení akustické aparatury Robertson Geologging Ltd. UK Slim Sonic Tool (WSSS) do provozu. MS 2006, zpráva interního TR  
AQUATEST a.s. Praha
- [2] PITRÁK, M. Návod na měření a základní interpretaci sondy vlnové akustické karotáže FWS50 firmy ALT Luxemburg. MS 2009, zpráva interního TR  
AQUATEST a.s. Praha

**Oponentní posudek vypracoval:**

**Ing. Jaromír Knejzlík, CSc., Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Ostrava**